CERN 向け 1.8 K ヘリウム冷凍システムの開発

Development of 1.8 K Helium Refrigeration System for CERN

吉	永	誠一	-郎	機械事業本部回転機械事業部汎用機械設計部
本	田	忠	明	エネルギー・プラント事業本部アルジェリアプロジェクト室 課長
榛	葉		透	エネルギー・プラント事業本部環境・プラント事業部第二基本設計部
尾	崎	伸	—	機械事業本部回転機械事業部汎用機械設計部 課長

1999 年に CERN(ヨーロッパ合同素粒子原子核研究機構)から受注した 1.8 K ヘリウム冷凍システムは,ヘリウム冷凍機で多くの実績をもつ Linde Kryotechnik 社(スイス)と国際コンソーシアムを組み,当社として初のヘリウム冷凍システムである.このシステムのコアとなるコールドコンプレッサは,当社が長年蓄積してきた最先端の極低温回転機械の技術を結集し,世界最高の効率を得ることに成功したものである.本稿では 1.8 K ヘリウム冷凍システムの解説から運転結果までを報告する.

The Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire (CERN) placed an order for a 1.8 K helium refrigeration system with IHI for the Large Hadron Collider project in 1999. IHI formed a consortium with Linde Kryotechnik AG (Switzerland), which has long experience with helium refrigeration systems. IHI designed and manufactured cold compressors based on leading technologies and expertise for turbo machinery. The cold compressor has the highest efficiency in the world. This paper describes the 1.8 K helium refrigeration system and performance test results at CERN.

1. 緒 言

CERN(ヨーロッパ合同素粒子原子核研究機構)は,ス イスのジュネープ郊外ジュラ山脈のふもとにあり,ヨーロ ッパ20か国がメンバとなって物理学の最先端分野である素 粒子の研究を行っている.そこで行われているLHC(Large Hadron Collider)計画は,既設の加速器リング内に新たに 超電導マグネット約1千台を並べて,陽子-陽子の衝突を 世界最大のエネルギー14 TeV で行う世界最大規模の大 型ハドロン衝突型加速器である.加速器の大きさは直径約 9 km,総延長約27 km ある.完成は当初の計画より少し遅 れて2007年を予定している.この計画には我が国を含む 世界の物理学者が参加し,我が国からは文部科学省と大学 共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構が協力して 資金も供出している.

既存のトンネルを利用する LHC 計画では,制限のある トンネル内のスペースに最大の効果を引き出せる超電導マ グネットを設置するという課題に対し,CERN は高磁場マ グネットを 1.9 K まで冷却が可能なシステムを採用して, 超流動へリウム冷却を行うものである.

LHC 計画では周囲約 27 km のトンネルに対して 8 か所

に冷却基地を設置して全長を冷却する.各冷却基地には大 気圧の液体ヘリウムを製造する 4.5 K/1.8 kW ヘリウム液 化冷凍システムと 1.8 K/2.4 kW ヘリウム冷凍システムが 併設される.当社は Linde Kryotechnik 社(スイス)と コンソーシアムを組み,冷却基地全 8 か所のうち,4 か所 の 1.8 K/2.4 kW ヘリウム冷凍システムを受注した.

2. 1.8 K ヘリウム冷凍システム

1.8 K ヘリウム冷凍システムのシステム構成を第1 図に, 仕様を第1 表に示す.別置された4.5 K ヘリウム液化冷凍 システムから約4 K の液体ヘリウムが被冷却体である加速 器リングの超電導マグネットに供給される.1.8 K ヘリウム 冷凍システムは,この供給された液体ヘリウムの雰囲気を 1.5 kPa まで減圧することによって,飽和温度である1.8 K まで液体ヘリウムを冷却させるのが目的である.

1.8 K ヘリウム冷凍システムは,タンデムスクリュー式 の常温圧縮機のほかに,4 段直列の遠心式ターボ圧縮機の コールドコンプレッサ,膨張タービン,熱交換器,バルブ などにこれらを収納する極低温コンプレッサボックスで構 成される⁽¹⁾.1.8 K ヘリウム冷凍システムのキーパーツで あるコールドコンプレッサは低温下でヘリウムガスを吸い



(注) は運転モードがインストールド時の設計値を示す.

第1図 1.8 K ヘリウム冷凍システム構成 Fig. 1 Flow diagram of 1.8 K helium refrigeration system

運転モード	11	ッスト ー 」	レド		ノーマル		ローインテンシティー			
項目	P (kPa)	T	m	P (kPa)	T	m	P (kPa)	T	m	
В	1.5	3.98	124	1.5	3.97	83.0	1.5	4.24	62.2	
С	300	4.6	1.69	300	4.6	1.69	300	4.6	1.69	
D	130	20.0	126.0	130	27.5	84.7	130	30.0	63.9	
								(注) P T	: 圧 力 : 温 度	

第1表 1.8 K ヘリウム冷凍システムの仕様 Table 1 Specifications of 1.8 K helium refrigeration system

m:流量

込み昇圧する.このため,常温下で昇圧する場合に比ベシ ステム全体の大きさを小さくでき,トータル効率を格段に 向上させることができる.

3. コールドコンプレッサの仕様

低温下で作動するコールドコンプレッサには機器の信頼 性,熱侵入による効率低下などの技術的課題が大きい.コ ールドコンプレッサの断面図を第2図に示す.

構造的な課題として,電気系の温度変化によるトラブル を避けるため,電動機や磁気軸受を常温側に配置した構造 としている.さらに駆動部分およびインペラ部は取外しを 可能にするため,カートリッジ式としてメンテナンス性に 優れた構造としている.第3 図にコールドコンプレッサの カートリッジ外観を示す.

また, ヘリウム系内は大気圧以下となるため, 不純ガス が混入すると冷凍機へ悪影響を及ぼす.この対策としてシ ール面はダブル O リングとし, O リング間にヘリウムガー ドと呼ぶ大気圧以上のヘリウムガスを封入しておくことで,



Fig. 2 Sectional drawing of cold compressor



第3図 コールドコンプレッサのカートリッジ外観 Fig. 3 Cold compressor cartridge

不純ガスの混入を防止する構造としている. 以下,コールドコンプレッサの主な特長を 述べる.

3.1 オイルフリー軸受

軸を非接触で運転し,メンテナンスフリ ーが可能なオイルフリー軸受には,ガス軸 受と磁気軸受がある.ガス軸受にはいろい ろな方式があるが,フォイル式動圧ガス軸 受はガスの供給装置が不要で,外乱に対し ても比較的強い特長があり使いやすい.磁 気軸受は,制御装置など複雑なシステムが 必要となるが,ガス軸受では負荷容量を十 分に得られない希薄な雰囲気や高負荷容量 を必要とする重い軸でも動作することがで きる.

当社はフォイル式動圧ガス軸受を採用し たコールドコンプレッサの納入実績は多く あるが,今回は入口圧力が1.5 kPa とガス 密度が低いことと軸質量が重く負荷容量が 大きいため,磁気軸受を採用した.

3.2 断熱構造

本機は常温からの熱侵入が圧縮機性能に 大きく影響を及ぼす.例えば,コールドコン プレッサ1段目(CC1)では20Wの熱侵 入が1%の断熱効率の低下となる.したがって,常温部と低 温部にあるインペラの間をできるだけ熱を伝えない構造と する必要がある.そのためには常温部と低温部間を真空断 熱することが最も効果的であるが,カートリッジ式として いることから,真空断熱を行うことは困難である.

コールドコンプレッサ独特の構造として軸とケーシング を伝わる熱進入を抑える断熱構造が必要である.このとき, 軸を長くすると危険速度が低下するので材質と形状の工夫 が必要である.

- (1) 断熱手段の一つは,軸の常温と低温間を真空の薄 肉円で結び,軸の危険速度を超えない範囲でできるだ け長くした.
- (2) 駆動部と低温のケーシングの接続部は,薄肉円筒でつなぎ,熱伝導量を少なくするとともに,外力による曲げ変形にも耐えられる肉厚を採用した.
- (3) ケーシング接続部には,60 K レベルのヘリウムガ スを流し,常温からの熱を吸収するヒートインターセ プトと呼ぶ中間冷却層を設けた.この中間の内部には 高純度無酸素銅製サーマルアンカーを設置し,内部の 常温からの熱を吸収する構造とした.
- (4) インペラ背面部には断熱性能が優れた断熱材を設置する必要がある.断熱材は,熱伝導率が固体断熱材よりも優れているヘリウムガス自身を用いる.しかしヘリウムガスを封入するだけでは対流が起こり,熱がより早く伝わってしまう.このため,ハニカム状のブロックを設置しガスの対流伝熱を抑え高断熱層を作りだした.

以上の対策を実施した結果,インペラ外径250 mmの 1 段目の熱進入量は軸1.2 W,ハニカム3.6 W,ケーシン グ2.4 W でトータル7.2 W となる.コールドコンプレッサ の設計点における軸動力2.2 kW に対して,熱進入による 効率低下は計算上0.4 ポイント程度となる.また,サーマ ルアンカーで取り除く熱量は135W である.

4. 試運転結果

4.1 1.8 K ヘリウム冷凍システム

2002 年 6 月に実施した 1 セット目の 1.8 K ヘリウム冷 凍システムの試運転結果を第 2 表に示す.本試験は超電導 磁石の熱負荷変動を模擬するテストクライオスタットを用 いて実施した.

各モードの所定流量以上で,1.5 kPa の条件が満たされ, 消費電力も保証値をクリアすることができた.このときの コールドコンプレッサの性能試験結果を第4 図に示す.ま た,コールドコンプレッサの断熱効率を第3 表に示す.作 動点の傾向は設計値どおりであるが,若干大流量側に近づ いている.これは常温圧縮機の流量特性が設計値よりも若 干増加したためである.しかし,作動点は若干ずれたもの の予想を上回る効率を達成できた.また,過渡運転時,減 圧運転時における作動点は,全自動で運転制御プログラム によって運転され,コンプレッサの作動範囲内で安全に運 転していることを確認できた^{(2)~(4)}.

4.2 コールドコンプレッサ性能

2003 年 7 月までにコールドコンプレッサ 4 セット分の カートリッジの性能試験を 1 セット目の 1.8 K ヘリウム冷 凍システムを用いて実施した.全 4 セットおよび予備カー トリッジの定格条件で運転を実施し,インストールドモー ドについてコールドコンプレッサの全セット性能試験結果 を第 5 図に示す.各セットごとに圧力比が若干異なり,特 に 1 セット目と 2 セット目が異なる.これは組付けの若干 の違いによるものと考えられる.しかし各セットに違いは あるものの全体の効率をみると保証値 60%に対し実測値は 66%を超えた⁽⁵⁾.

運転モード	インストールド					ノーマル				ローインテンシティー					
項 目 インタフェース	$\begin{array}{c} Q_G \ ({ m kW}) \end{array}$	$\begin{array}{c} Q_C \ (\mathrm{kW}) \end{array}$	P (kPa)	Т (К)	m (g/s)	$\begin{array}{c} Q_G \ (\mathrm{kW}) \end{array}$	$\begin{array}{c} Q_C \\ (\mathrm{kW}) \end{array}$	P (kPa)	Т (К)	m (g/s)	$\begin{array}{c} Q_G \\ ({ m kW}) \end{array}$	$\begin{array}{c} Q_C \\ (\mathrm{kW}) \end{array}$	P (kPa)	Т (К)	m (g/s)
В	465	443	1.50	3.38	123.9	334	311	1.40	3.40	83.0	275	274	1.50	3.78	62.2
С	465	443	116	13.4	0.70	334	311	120	4.50	2.00	275	274	130	4.50	1.69
D	465	443	116	17.4	124.6	334	311	115	19.6	85.6	275	274	114	20.6	64.6
													(注) Q Q P	_G :保証 C:消費	 E値電力 達電力

第2表 1セット目1.8Kヘリウム冷凍システムの試運転結果 Table 2 Commissioning results

T :温 度 m :流 量



第4図 コールドコンプレッサ性能試験結果 Fig. 4 Performance test results of cold compressor

第3表	コールドコンプレッサ断熱効率
Table 3	Adiabatic efficiency of test result

計	測	点	1段目	2 段目	3段目	4段目	
△:イン	ストール	ド	0.77	0.85	0.74	0.65	
ロ:ノー	マル		0.78	0.85	0.75	0.64	
× : ロー·	インテン	シティー	0.94	0.83	0.74	0.62	







5. 結 言

コールドコンプレッサの試験は 2003 年 7 月に現地テス トスタンドで全セット終了し,2004 年 3 月には常温圧縮機 が CERN に到着し,当社からの発送はすべて完了した.現 地では 4 か所の各サイトに Linde Kryotechnik 社のもとで 据付け工事が進行中である.物理学の世界最先端の巨大プ ロジェクトにそのキーハードを納入する形で当社の技術で 貢献することができた.また,本システムは設計,品質,性 能において格別な成果を挙げたことを高く評価され CERN から「ゴールデンハドロン賞」を受賞した.

今後もオイルフリー回転機械にこの技術・実績を反映さ せて設計・開発を進めていく.

謝 辞

本システムを開発し,この成果を高く評価されたのは, 関係各位のお力をお借りして成し得た結果である.特に大 学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究所機構・低温 工学センターには元センター長の平林洋美名誉教授,契約 当時センター長であった新富孝和教授,現センター長の山 本明教授と3代にわたって多くのご指導とご協力をいただ きました.ここに記し,深く感謝いたします.

参考文献

- (1) H. Asakura, J. Bösel, T. Honda, A. Kündig, K. Kurtcuoglu, A. Meier, M. Mori, A. Senn and S. Yoshinaga : Four 2 400 W / 1.8 K Refrigeration Unit for CERN-LHC · The IHI / Linde System Proceedings of 18th International Cryogenic Engineering Conference (2000.7)
- (2)本田忠明ほか: CERN LHC 用 1.8 K/2.4 kW 冷
 凍システム 運転結果 第 67 回低温工学・超電導
 学会講演概要集 2002 年 10 月
- (3) 吉永誠一郎ほか: CERN LHC 用 1.8 K/2.4 kW
 冷凍システム コールドコンプレッサ(性能試験結果) 第 67 回低温工学・超電導学会講演概要集2002 年 10 月
- (4) S. Claudet, G. Ferlin, Ph. Gully, B. Jager, F. Millet,
 P. Roussel and L. Tavian : A Cryogenic test station for the pre-series 2 400 W @ 1.8 K refrigeration units for the LHC Proceedings of 19th International Cryogenic Engineering Conference (2002. 7) pp. 83 - 86
- (5) S. Claudet, G. Ferlin, F. Millet and L. Tavian :
 1.8 K Refrigeration Units for the LHC Performance Assessment and Comparison of Cobtrol Pre-print of CEC2003 Cryogenic Engineering Conference (2003)